

学校编码: 10384
学号: 19920101152758

分类号__密级__
UDC_____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

六自由度绳牵引并联机构的
运动控制系统研究与实现

Study and Implementation on Motion Control System of
6-DOF Wire-driven Parallel Manipulator

王 钊

指导教师姓名: 林 麒 教 授

专 业 名 称: 机械设计及理论

论文提交日期: 2013 年 5 月

论文答辩时间: 2013 年 6 月

学位授予日期: 2013 年 月

答辩委员会主席: _____
评 阅 人: _____

2013 年 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士论文摘要库

摘 要

将绳牵引并联机构支撑系统引入低速风洞试验，大大改善了传统硬式支撑对空气流场的干扰状况。本文对这种绳牵引并联机构在风洞动态试验要求下的运动控制系统和数据采集系统展开了研究，分析了机构的运动学模型，搭建了伺服系统、运动控制系统和数据采集系统硬件，编写了整个系统软件，并对系统的试验能力进行了检验。本文的主要工作和成果如下：

首先，在欧美坐标系下定义了机构的坐标系和欧拉姿态角，进而根据坐标变换相关理论描述了原理样机的齐次坐标变换形式。以此为基础，建立了基于防脱绳万向滑轮的原理样机精确运动学模型，为更加精确的运动控制奠定了理论基础。

其次，建立了第二代 WDPSS-8 原理样机，包括设计、搭建和调试了伺服系统及相应的电气系统、PMAC 运动控制系统、位姿测量系统等硬件系统。介绍了各个硬件子系统的组成结构和工作原理，为原理样机实现良好的动态试验性能奠定了硬件基础。

再次，在各个子系统硬件的基础上，完成了控制软件的编写。利用 Tilcon 开发了上位机操作界面，编写了运动控制程序框架，运用 Windows 多线程技术解决了 PMAC 通信速度问题，编写了姿态角采集程序、OpenGL 三维仿真显示程序和绳拉力采集程序。为 WDPSS-8 原理样机提供了人机交互、运动控制、数据采集、仿真显示等各系统集成控制环境。

最后，通过试验考察了原理样机的性能，对角度和频率跟踪精度分别进行了对比分析，并针对试验误差的变化情况阐述了可能的误差来源，验证了飞行器进行风洞动态试验在机电控制上的可行性。

本文的研究实现了基于低速风洞动态试验的绳牵引并联机构运动控制与测量，同时为课题的更深入研究打下了良好的基础。

关键词：绳牵引并联机构，风洞试验，运动控制，PMAC，Tilcon

ABSTRACT

By applying Wire-driven parallel system into low speed wind tunnel, we can greatly improve the air flow field interference of traditional rigid support system. This thesis investigated the motion control and data acquisition of this Wire-driven parallel system in the dynamic experiment condition. Analyzed the kinematics and dynamics model, built the hardware system which includes servo system, motion control systems and data acquisition system. Compiled the whole suite of software, and tested the system. The main works and achievement are as follows:

Firstly, defined the agencies coordinate system and the Euler attitude angles in Europe and the United States coordinate system, And then described the homogeneous transformation form of the prototype according to coordinate transformation theory. And established a kinematic model of the principle of the prototype based on universal pulley, thus laid a theoretical foundation for a more accurate motion control.

Secondly, designed, constructed and tested the corresponding electrical system, PMAC motion control system, the position and orientation measurement system of the servo system, laid a hardware basis to achieve good dynamic test performance.

Thirdly, completed the compilation of the control software on the basis of subsystem hardware. Developed the user interface by Tilcon, wrote a motion control application framework, solved the PMAC communication speed problem by using the Windows multi-threading technology, wrote the attitude angle acquisition program, OpenGL 3D simulation program and rope pull collection program.

And lastly, investigated the performance of the prototype, verified the feasibility of wind tunnel dynamic tests on the mechanical and electrical control.

The study achieved dynamic motion control and measurement of Wire-driven parallel system based on the low-speed wind tunnel, and laid a good foundation for in-depth study of the subject.

Key Words: Wire-driven Parallel Manipulator, Wind Tunnel Test, Motion Control, PMAC, Tilcon

目 录

第一章 绪论	1
1.1 绳牵引并联机构研究概况	1
1.2 本文研究的背景及主要内容	4
第二章 WDPSS-8 原理样机运动学分析	8
2.1 原理样机的坐标系与参数描述	8
2.1.1 机构坐标描述	10
2.1.2 飞行器姿态角描述	10
2.2 坐标变换	11
2.2.1 常用坐标变换	11
2.2.2 原理样机的齐次坐标变换	13
2.3 机构运动学	14
2.3.1 运动学位置逆解	14
2.3.2 运动学速度逆解	19
2.4 本章小结	21
第三章 系统硬件设计与调试	22
3.1 原理样机的总体硬件结构	22
3.2 伺服系统硬件及参数调试	23
3.2.1 伺服电动机	23
3.2.2 伺服驱动器	26
3.2.3 电气系统	28
3.3 PMAC 系统硬件及参数调试	30
3.3.1 PMAC 运动控制系统总体结构	30
3.3.2 PMAC 运动控制卡	31
3.3.3 控制接线	32
3.3.4 硬件限位	34
3.3.5 PMAC 参数调试	35
3.4 位姿测量系统硬件	40
3.4.1 航姿参考系统 (AHRS)	40
3.4.2 位姿测量系统硬件组成	41

3.5 绳拉力采集系统硬件	42
3.6 本章小结	44
第四章 控制系统软件开发	45
4.1 Tilcon 图形界面开发.....	45
4.1.1 Tilcon 的组成原理	45
4.1.2 运动控制程序界面.....	46
4.1.3 Tilcon 主程序框架	51
4.2 基于多线程的 PMAC 运动控制	53
4.2.1 Windows 多线程技术	53
4.2.2 PMAC 与应用程序通信	56
4.2.3 PMAC 命令	57
4.2.4 轴运动控制.....	63
4.2.5 静导数试验运动控制.....	64
4.2.6 动导数试验运动控制.....	68
4.3 数据采集	71
4.3.1 位姿数据采集与显示.....	71
4.3.2 绳拉力采集.....	75
4.4 本章小结	77
第五章 控制试验	79
5.1 风洞试验	79
5.2 动态运动控制试验	80
5.3 本章小结	89
第六章 总结与展望	90
6.1 总结	90
6.2 展望	91
参 考 文 献	93
攻读学位期间发表的成果目录	98
致 谢.....	99

CONTENTS

Chapter 1 Preface	1
1.1 Overview of Wire-driven Parallel Mechanism.....	1
1.2 Background and main content.....	4
Chapter 2 Kinematic analysis of WDPSS-8 prototype	8
2.1 Coordinate and parameter description of the prototype	8
2.1.1 Coordinate descriptions of the prototype	10
2.1.2 Attitude angle descriptions	10
2.2 Coordinate transformation	11
2.2.1 Common coordinate transformation	11
2.2.2 Homogeneous coordinate transformation of the prototype	13
2.3 Mechanism kinematics	14
2.3.1 Inverse kinematics of position	14
2.3.2 Inverse kinematics of velocity	19
2.4 Brief summary.....	21
Chapter 3 Hardware design and debugging	22
3.1 General structure of hardware	22
3.2 Servo System hardware and parameter testing	23
3.2.1 Servo motor.....	23
3.2.2 Servo drive	26
3.2.3 Electrical System	28
3.3 PMAC hardware and parameter testing	30
3.3.1 General structure of PMAC Motion Control System	30
3.3.2 PMAC Motion Control Cards	31
3.3.3 Control lines.....	32
3.3.4 Hardware limit	34
3.3.5 PMAC parameter testing.....	35
3.4 Pose measurement system hardware	40
3.4.1 AHRS	40
3.4.2 Hardware components of pose measurement system	41

3.5 Tension collection system hardware.....	42
3.6 Brief summary	44
Chapter 4 Control system software development.....	45
4.1 Tilcon GUI development	45
4.1.1 Composition principle of Tilcon	45
4.1.2 Interface of motion control program	46
4.1.3 Main frame of Tilcon program	51
4.2 PMAC motion control based on multithreading.....	53
4.2.1 Multithreading technology of Windows	53
4.2.2 PMAC communication with the application.....	56
4.2.3 PMAC command	57
4.2.4 Axis motion control	63
4.2.5 Motion control of static derivative test	64
4.2.6 Motion control of dynamic derivative test.....	68
4.3 Data collection	71
4.3.1 Pose data collection and display	71
4.3.2 Tension collection.....	75
4.4 Brief summary.....	77
Chapter 5 Control test.....	79
5.1 Wind tunnel test	79
5.2 Dynamic motion control test.....	80
5.3 Brief summary.....	89
Chapter 6 Conclusion and prospect.....	90
6.1 Conclusion	90
6.2 Prospect.....	91
References	93
Publications	98
Acknowledgments	99

第一章 绪论

1.1 绳牵引并联机构研究概况

作为一种新型的并联机器人,绳牵引并联机构既有传统并联运动机构的高刚度、高精度、高速度、高承载能力等优点,又有绳索驱动机构的驱动源固定、重量轻、惯性小等优点。从 20 世纪 80 年代初至今,绳牵引并联机构已逐渐成为国内外研究的一大热点,广泛应用于航空、工业和军事等领域^[1,2]。

早在 1984 年, Landsberger 等人就已经提出了绳牵引并联机器人的设计问题^[3],其早期主要是在集装箱吊装方面的应用,主要研究内容包括定位、刚度和工作空间分析等。1989 年, Dagalakis 等研制了带有串联子系统的绳牵引并联机构 Robotrane,提出了应用于起重场合的绳牵引并联机器人,并对其刚度、工作空间和结构设计等方面进行了分析^[4]。这是绳牵引并联机构的最早期应用,此后绳牵引并联机构理论进一步发展。Ming A 和 Higuchi T 在 1994 年指出,由于牵引绳只能受拉力而不能受压力,因此绳牵引并联机构为保证良好约束,需采取冗余驱动方式,即构成 n 自由度的绳牵引并联机构至少需要 $n+1$ 根牵引绳^[5]。同时, Ming A 给出了完全约束定位机构 CRPMs (Compeletely Restrained Positioning Mechanisms) 的基本分类,并指出不完全约束定位机构 IRPMs (Incompeletely Restrained Positioning Mechanisms) 需要借助外力(如重力)来保持机构的稳定性,并且通过构建 CRPMs 原理样机对其控制问题进行了研究。2007 年 Hithoshi Kino 等在对使用最少数量绳索且零重力条件下绳牵引并联机构平移系统的运动控制提出了点对点(PTP)的位置控制方法,采用自适应补偿的方式来为 PD 型鲁棒控制抵消内力误差,给出一种具有不确定性的 Jacobian 矩阵,并运用李雅普诺夫稳定性对系统的鲁棒性进行分析^[6]。2009 年, Gabriel Meunier 等对用于一种新型大型射电望远镜的绳牵引并联机构动力学进行了分析,设计了基于级联控制结构的控制策略,其中内部控制回路调节每根绳子的拉力,外部控制回路采用逆动力学控制和 PID 控制来调节进给平台的姿态^[7]。2011 年, Alireza Alikhani 等针对一种大尺寸的 Delta 绳牵引并联机器人建立了运动学和动力学模型,采用输入约束和干扰下的鲁棒滑膜控制,并用李雅普诺

夫第二方法证明了控制律的渐进稳定性^[8]。同年, Tej Dallej 提出了两种利用计算机视觉反馈控制绳牵引并联机器人的方法, 一种是使用三维运动姿态的视觉伺服控制方法, 另一种是融合了三维姿态和速度的视觉计算力矩控制方法^[9]。2013 年, Mohammad 等对完全约束的绳牵引并联机器人的鲁棒 PID 控制进行了详细研究, 并将理想的刚性牵引绳鲁棒 PID 控制通过奇异摄动理论进行扩展, 建立了考虑牵引绳弹性的复合控制律^[10]。

在国内, 越来越多的学者也加入了绳牵引并联机构的研究行列。如华侨大学的郑亚青对绳牵引并联机构的理论进行了系统的研究, 对欠约束绳牵引并联起重机器人的机构设计、静刚度与运动学逆解做了相关研究, 此外还对用于风洞试验的六自由度绳牵引并联机构的动力学、工作空间、流固耦合、振动问题以及气动导数的解算原理等进行研究, 并做了相关模拟仿真^[11-15]。厦门大学的林麒等人建立了八绳牵引的六自由度绳牵引并联机构原理样机, 对机构的运动学分析、动力学分析、运动控制、机构刚度解析、绳干涉推导以及气动导数解算等进行了研究, 把视觉用于飞行器模型的姿态测量, 同时为了提高模型俯仰振荡的工作空间给出时变结构方案, 并且成功在低速风洞试验中获取了飞行器模型的静导数和动导数^[16-20]。刘欣、仇原鹰等人对风洞试验绳牵引冗余并联机器人的刚度增强与运动控制进行了研究, 并推导出绳牵引并联机器人完备干涉判定条件^[21-24]。南京航空航天大学的吴洪涛等对用于风洞试验的柔索驱动并联支撑系统的机构设计、运动学、静力学、工作空间也做了分析研究^[25,26]。安徽理工大学的汪选要等在拉力分布优化和工作空间方面^[27], 重庆大学的谢志江等人在运动学优化方面^[28], 中国矿业大学的訾斌在机构动力学和运动控制方面^[29], 上海海事大学的陈峰在可达工作空间方面^[30], 中科院的刘含玮等人在控制精度问题方面^[31], 北京航空航天大学的张玉茹在工作空间和奇异性方面^[32], 西安文理学院的肖红军在遗传算法进行多目标优化方面^[33]。清华大学张浩在机构设计参数优化方面^[34], 都进行了较为深入的研究。

在原理样机方面, Sadao Kawamura 等人于 1995 年提出一种由 7 绳牵引的六自由度并联机构 FALCON (FAst Load CONveyance) 其力传递性能好、工作空间大, 并且具有极高的加速度。针对此原理样机 Kawamura、Morizono 和 Takeda 等人分别对其绳索振动问题^[35]、超高速控制问题^[36]和力传递性能进行了

分析^[37]。此后, Kawamura 等提出了一种减少机构振动的方法, 使机构在 60W 电机驱动下不发生振动现象, 且加速度 40G 以上, 最大速度可达 13m/s^[38]。1999 年, Kiyoshi Maeda 等从机构的工作空间出发点设计出一种 WARP (Wirepuller-Arm-driven Redundant Parallel), 并通过校准机构运动学相关参数来补偿原理样机的加工和装配误差^[39]。2005 年, Fumiaki Takemura 等则是把绳牵引并联机构应用到城市地震灾害的人员搜索和信息采集中, 开发了空中气球绳牵引并联机器人^[40]。2008 年, Merlet 开发了具有 7 根绳子的 Gough-Stewart 平台, 并对该冗余驱动系统的运动学进行了分析, 其分析过程考虑了绳索的弹性变形^[41]。2012 年, 荷兰的 K.H.J. Voss 等研究了绳牵引并联机构与表面交互作用的功能, 即在考虑了绳索质量的前提下, 提出一种研究机构工作空间的方法, 在该方法下绳索之间不会互相干涉并且可以产生表面作用力。运用该方法 Voss 研制出用在大型建筑物表面清洗的绳牵引并联机器人, 为绳牵引并联机构应用到实际的又一成功案例^[42]。

国内在绳牵引并联机构原理样机或工程应用方面的研究并不多见。2002 年, 西安电子科技大学为我国 FAST 项目的 500m 大射电天文望远镜 (large radio telescope, LT) 建立了 LT5m 和 LT50m 缩比模型, 其舱索系统为大型柔索驱动并联机器人, 孙欣、仇原鹰、訾斌等人对上述系统的逆运动学及逆动力学模型^[43]、控制算法^[44]、机构的解空间、工作空间、悬索张力^[45]等方面进行了较为深入的研究。2010 年, 针对在康复训练过程中协调控制患者骨盆运动轨迹的问题, 哈尔滨工程大学的刘攀、张立勋等建立了由 4 根绳索牵引的三自由度绳索牵引并联机器人样机, 在对动力学分析的基础上, 提出一种力/位并行控制策略^[46,47]。

由于结构设计和运动控制的复杂性, 国内外建立应用于风洞试验的绳牵引并联机构原理样机的还比较少见。2003 年, John C. Magill 等设计了用于虚拟飞行试验 (Virtual Flight Testing) 的风洞绳索支撑装置, 飞行器模型可做低摩擦的俯仰、滚转和偏航运动, 所承受的气动载荷通过装在模型内部的应变天平测量得出, 此外 Magill 等还对该装置的动力学进行了研究^[48]。法国国家宇航研究局 (ONERA) 正在支持一项联合研究项目——低速风洞绳牵引并联支撑系统 “SACSO 项目”。SACSO 是一种新型的风洞试验支撑系统, 它采用了 9 绳牵引的并联机构。该项目的研究工作已开展了多年, 目前已通过试验验证了绳索对

气动流的影响，在理论上也实现了模拟自由飞（free flight）的可行性。但由于“SACSO 项目”为法国国防部的研究项目，研究成果很少见诸于学术刊物^[49]。

1.2 本文研究的背景及主要内容

风洞是推动航空航天技术发展的关键设备。在研制新型飞行器（如飞机、火箭、导弹和卫星等）的过程中，风洞吹风试验都是一个相当重要的环节。在进行风洞试验时，应将飞行器缩比模型置于风洞的试验段，通过某种模型支撑系统改变飞行器的姿态并尽可能模拟飞行器在空中飞行的真实情况，测量所需要的空气动力载荷数据^[50]。为了满足飞行器缩比模型姿态变化的要求，离不开相应的模型支撑系统，模型支撑系统对流场结构的影响，以及是否具有较高刚度和较大动态响应特性，直接关系到试验结果的可信程度。

风洞的模型支撑系统主要可分为串联风洞模型支撑与并联风洞模型支撑两种。其中传统的串联支撑由一系列机械结构件串联组成，包括尾撑、腹撑、背撑等“硬式”支撑形式。但是由于支杆的存在，串联支撑系统在一定程度上改变了模型的局部外形，对模型附近的流场产生了不同程度的影响。其次，对于现代大迎角高机动战斗机，由于要求其迎角范围可达 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ，而大攻角试验时气动力的影响会引起串联支撑系统的振动并加大测量的误差，因此很难满足整个迎角范围。同时由于串联风洞模型支撑是通过控制支撑飞行器模型的支撑轴以实现各种姿态变化，支撑轴需要承载模型的所有重量，因此如果增加支撑轴的尺寸和重量以增大刚度，将导致移动部件的增重从而降低系统的动态响应特性。此外串联支撑系统在进行多姿态角组合变化试验以及动态试验时，复杂而庞大的支架对流场造成的干扰是很难通过一般的修正方法得到较准确的试验结果的^[51,52]。

随着并联机构学的不断发展，逐渐出现了并联风洞模型支撑系统。例如基于 Stewart 平台的液压并联机构支撑系统、基于 Hexaglide 平台的并联机构支撑系统以及基于六自由度绳牵引的并联机构支撑系统。其中绳牵引并联机构通过若干根弹性模量很高的绳索牵引，使飞行器模型的支撑接近于真实飞行条件，调节各绳长度即可实现模型在不同姿态角下的灵活变化。由于改变绳长可快速调整模型在风洞中的姿态，因此绳牵引并联机构能够实现模型的动态吹风试验，

从而可以进行常规风洞试验无法进行的复杂飞行性能研究，这些都是传统串联支撑系统难以做到的。相比于串联支撑系统，绳牵引并联支撑机构还具有以下优点^[53]：

- (1) 较高的刚度，并且结构简单、稳定。
- (2) 容易实现高速、高频率的运动。
- (3) 负载能力高、具有较大的载荷重量比。
- (4) 在位置求解方面，逆解方程更容易得到。
- (5) 易拆装、模块化程度高。
- (6) 绳索对模型周围流场干扰小，能够解决“硬式”支撑气流干扰问题。

在现代民用飞机设计中，安全性是飞机设计必须要保证的首要指标，也是民机研发的重中之重。飞行器在飞行时产生的非线性流动现象会对其自身的动稳定性特性产生强烈影响，而动态参数的剧烈变化往往是造成飞行器机翼抖振、头部偏摆、偏航反效、滚转异常以及螺旋失控等民机事故的主因。因此，在具体型号的设计过程中，不仅要事先了解飞机在各种飞行条件下的气动力及力矩特性，对飞机的稳定性给出预判，还要能够知道飞机的动稳定性导数^[54]。在风洞试验中获取飞行器模型的动导数，通常是采用模型强迫振荡运动的方法，测量其气动载荷参数。

本文是国家自然科学基金项目——《基于绳牵引并联支撑系统的低速风洞动态试验关键技术研究（项目资助编号为：11072207）》的重点工作，所研究的对象是用于风洞动态试验模型支撑的六自由度绳牵引并联机构，研究目标是要对绳牵引并联机构的原有样机的运动控制系统进行更新升级，以适应样机应用于风洞动态试验的要求。

该项目的前期工作已经完成对绳牵引并联机构的数学建模，并进行了运动学和动力学分析，搭建第一代原理样机初步实现了飞行器模型的六自由度运动控制，并进行了风洞模型静态吹风试验等相关研究。但是，样机在前期研究中暴露出了很多问题。要将原理样机用于风洞动态试验，急需解决以下关键问题：

- (1) 第一代原理样机的牵引绳均利用固定轴滑轮进行导向，当控制飞行器模型在空间做六自由度运动时，经常发生脱绳现象，严重影响研究进展。另外，随着控制要求的提高，机构中的各个滑轮铰点尺寸所带来的误差也成为影响控

制精度的重要因素。因此,需要设计一种能够很好地避免脱绳现象的滑轮机构,并且在此基础上建立运动学模型,给出其逆解。

(2) 风洞动态试验对系统的响应速度和精度提出了更高的要求,原有的步进电机和固高运动控制卡在动态特性和轴扩展性上难以满足动态试验的要求,需要对运动控制的硬件进行升级改进,并重新编写基于新硬件的控制软件。

(3) 运动控制中飞行器的理论姿态角和实际姿态角不可避免的存在一定误差,飞行器实时的实际姿态角对于风洞试验结果的解算显然更具有参考价值。因此需要建立一套能够实时采集和记录飞行实际器姿态角数据的系统。

(4) 绳拉力数据是风洞试验中的关键数据,获取这些数据的实时性以及获取姿态角数据的同步性都直接影响到试验数据的可信度,绳拉力采集系统程序与控制软件的兼容性也会影响到整个系统的稳定性。因此,将绳拉力采集系统程序与控制软件进行集成显得很有必要。

按照上述研究思路,本文首先对整个绳牵引并联机构进行了运动学分析,特别是建立了基于万向滑轮的运动学数学模型;然后搭建了安川和松下伺服系统、伺服电气系统、PMAC 运动控制系统、姿态角测量系统等,并对上述所有系统硬件进行了调试;基于所有硬件系统,重新编写了上位机软件,包括基于 Tilcon 的用户交互界面、各种试验所需运动控制程序、姿态角数据采集程序、OpenGL 三维仿真程序、绳拉力采集程序等。最后,通过具体试验验证了各个系统,特别是运动控制系统的工作性能。

按照章节顺序,对本文研究的主要工作简述如下:

第一章,概述了国内外对绳牵引并联机构的研究概况,介绍本文研究的背景意义、课题项目来源以及研究的主要内容。

第二章,设计并加工了万向滑轮机构取代固定滑轮,解决了绳滑脱问题;在原有样机绳牵引并联机构的结构参数的基础上,建立了包含万向滑轮机构的绳牵引并联机构运动学模型,给出其逆解,以供运动控制采用。

第三章,对第一代原理样机的运动控制系统硬件进行更新升级,并详细介绍了更新后各个子系统硬件和调试方法,包括安川和松下伺服系统,负责伺服系统供电和滤波的电气系统,PMAC 运动控制器及其外围扩展板、供电电源,基于 AHRS(航姿参考系统,英文全文为 Attitude and Heading Reference System)

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库